

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011

Оригинальная статья

Извлечение металлов из убогого сырья и хвостов переработки руд с активацией процессов путем комбинирования химической и механической энергии

В.И. Голик^{1,2}, О.Г. Бурдзиева¹

¹ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а,
e mail: v.i.golik@mail.ru;

² Московский политехнический университет, Россия, 107023,
г. Москва, Б. Семеновская, 38

Статья поступила: 29.11.2023, доработана: 28.02.2024, принята к публикации: 01.03.2024

Резюме: Актуальность темы исследования объясняется необходимостью поиска инновационных способов извлечения металлов из убогого сырья и хвостов переработки руд, в том числе, с активацией процессов извлечения металлов путем комбинирования химической и механической энергии. **Методика** достижения поставленной цели позволяет оценить возможности глубокой переработки в условиях горных предприятий различных отраслей и определить эколого-экономический эффект реализации новых технологий. **Результаты.** Сформулирована концепция глубокой переработки некондиционного минерального сырья, решающая одновременно и экологические и экономические проблемы разработки месторождений. Предложена математическая модель процесса выщелачивания металлов из некондиционных руд и хвостов их обогащения с повышением их технологических свойств активацией в дезинтеграторе. Предложена интегральная экономико-математическая модель процесса и расчет экономического эффекта вариантов вовлечения некондиционного минерального сырья в производство. Экспериментально подтверждено, что интенсификация процессов выщелачивания металлов достигается использованием возможностей дезинтегратора. Показано, что уменьшение содержания металлов с увеличением глубины работ будет удорожать стоимость товарных продуктов. Определено, что перспективным направлением извлечения металлов из некондиционного сырья является комбинированное химическое обогащение и механическая активация в рабочем органе дезинтегратора. Выщелачивание в дезинтеграторе существенно увеличивает извлечение металлов в раствор и открывает возможность безотходного производства металлов при не-однократной переработке сырья. Методы извлечения металлов выщелачиванием некондиционного сырья получают развитие на ряде горных предприятий. Концепция глубокой переработки некондиционного минерального сырья реализуется путем применения математических моделей и пакета программного обеспечения.

Ключевые слова: металл, извлечение, активация, математическая модель, дезинтегратор, интенсификация, эффективность.

Для цитирования: Голик В.И., Бурдзиева О.Г. Извлечение металлов из убогого сырья и хвостов переработки руд с активацией процессов путем комбинирования химической и механической энергии. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 152-161. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011

DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011

Original paper

Extraction of metals from low-grade raw materials and ore processing tailings with process activation by combining chemical and mechanical energy

V.I. Golik^{1,2}, O.G. Burdzieva¹

¹ Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e mail: v.i.golik@mail.ru;

² Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semyonovskaya Str.,
Moscow 107023, Russian Federation;

Received: 29.11.2023, revised: 28.02.2024, accepted: 01.03.2024

Abstract: The relevance of the research is explained by the need to find innovative ways to extract metals from low-grade raw materials and tailings of ore processing tailings, including activation of metal extraction processes by combining chemical and mechanical energy. **Methods.** The methodology for achieving this aim makes it possible to assess the possibilities of deep processing in the conditions of mining enterprises of various industries and determine the ecological and economic effect of the implementation of new technologies. **Results.** The concept of deep processing of substandard mineral raw materials has been formulated, which simultaneously solves both environmental and economic problems of field development. A mathematical model of the process of extracting metals from substandard ores and enrichment tailings with an increase in their technological properties by activation in a disintegrator is proposed. An integrated economic and mathematical model of the process and calculation of the economic effect of options for involving substandard mineral raw materials in production are proposed. It has been experimentally confirmed that the intensification of metal leaching processes is achieved by using the capabilities of the disintegrator. It is shown that a decrease in the content of metals with an increase in the depth of work will increase the cost of commodity products. It is determined that a promising direction for the extraction of metals from substandard raw materials is combined chemical enrichment and mechanical activation in the operating device of the disintegrator. Leaching in the disintegrator significantly increases the recovery of metals into solution and opens up the possibility of waste-free metal production with repeated processing of raw materials. Methods for extracting metals by leaching substandard raw materials are being developed at a number of mining enterprises. The concept of deep processing of substandard mineral raw materials is realized through the use of mathematical models and a software package.

Keywords: metal, extraction, activation, mathematical model, disintegrator, intensification, efficiency.

For citation: Golik V.I., Burdzieva O.G. Extraction of metals from low-grade raw materials and ore processing tailings with process activation by combining chemical and mechanical energy. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 152-161. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011

Введение

Добыча полезных ископаемых отличается масштабностью и применением высокопроизводительной техники. Добыча стратегически важных и ценных руд характеризуется динамичностью, обусловленной конъюнктурой сырья на рынке. Эффективность разработки рудных месторождений связана с размещением предприятий на малоосвоенных территориях [Дмитрак и др., 2019; Валиев и др., 2020; Галачиева и др., 2018].

Извлеченное из недр некондиционное минеральное сырье подвержено дезинтеграции, продукты которой формируют концентрации тяжелых металлов и токсичных элементов с негативными последствиями для флоры, фауны и социума [Игнатьева и др., 2021; Ляшенко и др., 2020; Заалишвили и др., 2021; Нуреев и др., 2022; Бурдзиева и др., 2023; Doifode, Matani, 2015].

Хранение извлеченного из недр некондиционного сырья приносит окружающей среде пока еще недостаточно оцениваемый ущерб, поэтому радикальной мерой снижения опасности является его безотходная утилизация. Традиционные обогащательные процессы позволяют выделять из хвостов товарные продукты, но оставляют после себя вторичные хвосты [Hulelidze et al., 2016; Бывальцев и др., 2019; Валиев и др., 2019].

Увеличение объемов хвостов в хранилищах является следствием концепции валовой выемки руд в расчете на прогресс технологий их обогащения на земной поверхности, которая себя не оправдала.

Эффективность предложенной концепции требует экспериментального доказательства, предлагаемых к применению, технологий.

Приоритетным направлением становится оптимизация параметров активации для максимального извлечения металлов при минимальных затратах энергии [Бунин и др., 2017; Рыбак и др., 2021; Чантурия, 2017]. Это осуществляется путем использования активаторов процесса, нередко комбинируемых. Так, в промышленной установке (Пенсильвания, США) комбинировали барабанную мельницу фирмы «Fuller» и вибрационную мельницу фирмы «Micro Grinding Systems, Inc.», США (рис. 1).

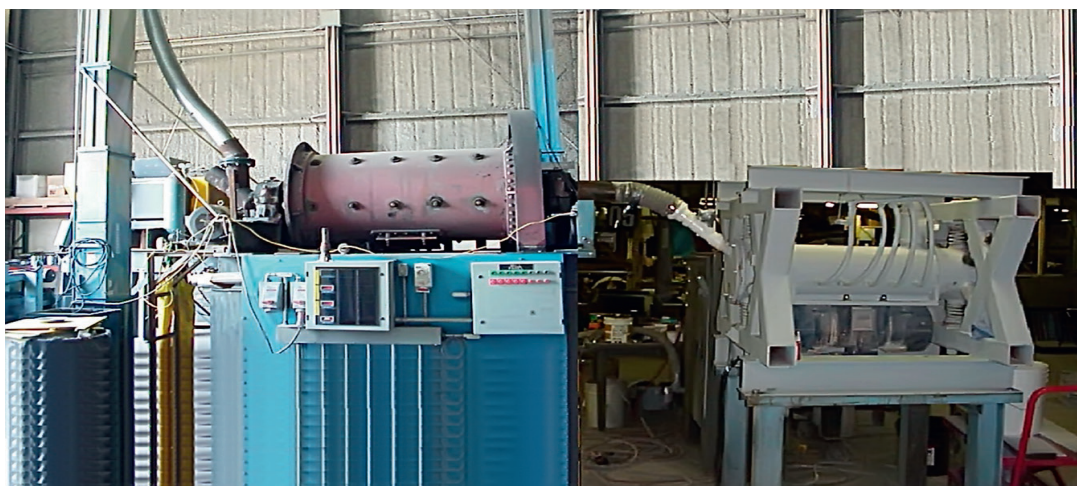


Рис.1. Промышленная установка с комбинированием активаторов /

Fig. 1. Industrial plant with activator combinations

Способом решения проблем безотходного извлечения металлов из некондиционного по содержанию металлов сырья является механохимическая технология, основу которой составляет концепция выщелачивания в быстроходной мельнице – дезинтеграторе [Хинт, 1981; Golik et al., 2020; Golik et al., 2023].

Эта концепция нуждается в практическом и теоретическом обосновании, чему и посвящена статья, содержащая результаты первого в практике горного дела при-

менения реагентного выщелачивания металлосодержащих минералов в дезинтеграторе, осуществленного в Геофизическом институте Владикавказского научного центра РАН (Отдел геологии, гидрогеологии и геоэкологии).

Методика исследования

Для обоснования целесообразности применения новой технологии использована выпускаемая промышленностью дезинтеграторная установка ДЕЗ-11 (рис. 2).

В основу методики исследований положены программа СКТБ «Дезинтегратор» и практика промышленного использования дезинтеграторной установки на месторождении «Шокпак» (Северный Казахстан).

Этапы комплексных исследований способов реагентного выщелачивания:

- в агитаторах (базовый способ);
- в дезинтеграторе (новый способ).

Свойства руд и параметры их переработки исследованы в ходе переработки хвостов обогащения Мизурской фабрики (РСО–Алания).

Хвосты просеивали и подавали в рабочий орган дезинтегратора. Туда же дозировано подавали реагенты.



1.

Рис. 2. Лабораторный дезинтегратор Дез-11 /

Fig. 2. Laboratory disintegrator Des-11

По величине изменения содержания в хвостах судили об эффективности выщелачивания свинца и цинка. Принципиальное устройство дезинтегратора для выщелачивания металлов поясняется рис. 3.

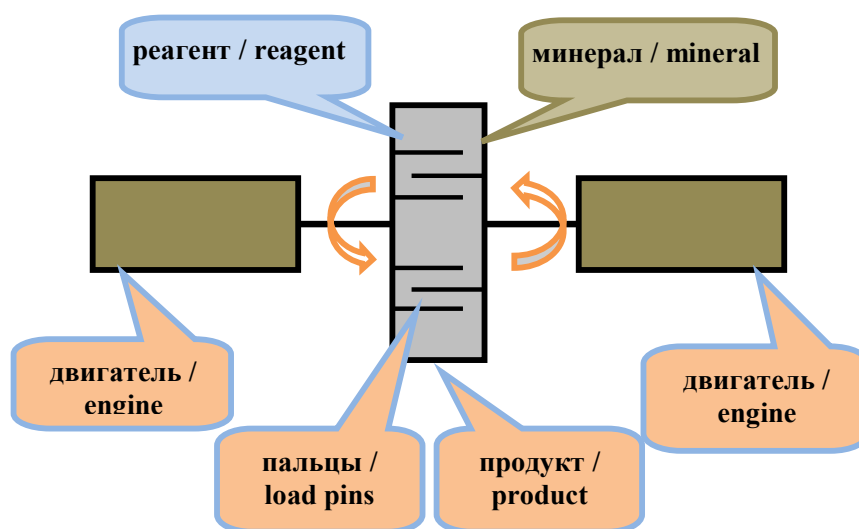


Рис. 3. Принцип выщелачивания металлов в дезинтеграторе /
Fig.3. Principle of metal leaching in the disintegrator

Эффективность извлечения металлов исследовали сравнением показателей выщелачивания в агитаторе и в дезинтеграторе в течение 60 минут. Результаты опытов интерпретировали графически, а параметры выщелачивания описывали математически.

Порядок проведения экспериментов:

1. Отбор 50 г высушенного материала для единичного эксперимента.
2. Приготовление выщелачивающего раствора заданного состава для единичного эксперимента при данном соотношении Ж:Т.
3. Приготовление пульпы смешением раствора с рудным материалом.
4. Пропуск пульпы через дезинтегратор, роторы которого вращаются с заданной скоростью.
5. Фильтрация продукционного раствора.
6. Анализ содержания металлов в растворе.
7. Фиксирование результатов анализа.
8. Выполнение регрессионного анализа с определением рациональных значений независимых параметров процесса выщелачивания.

Энергетические показатели определяли прибором Н 339 и амперными клещами на электродвигателях дезинтегратора на холостом ходу и во время работы дезинтегратора.

Результаты исследования

Исследованные варианты выщелачивания различаются тем, что продолжительность агитационного выщелачивания для извлечения одинакового количества металлов на два порядка превышает продолжительность выщелачивания в дезинтеграторе. Из этого можно сделать вывод о том, что выщелачивание в дезинтеграторе эффективнее, чем в агитаторе. При этом необходимо отметить, что во всех вариантах цинк выщелачивается легче, чем свинец.

Прибыль от извлечения металлов из некондиционного сырья может быть определена применением экономико-математической модели:

$$\Pi = \frac{\sum_{i=1}^n (C - Z) Q}{t} + III,$$

где Π – прибыль, руб./т;

C – реализация продуктов переработки хвостов, руб./т;

Z – затраты на переработку хвостов, руб./т;

n – номенклатура компонентов хвостов;

Q – масса хвостов, т;

t – продолжительность переработки;

III – штрафы за хранение хвостов, руб./год.

Показатели конкурирующих технологий выщелачивания металлов определены для условий Садонских месторождений (Северный Кавказ) путем сопоставления показателей извлечения металлов из богатых руд на фабрике (1), выщелачивания бедных руд в подземных блоках (2) и хвостов флотационного обогащения (3). Моделирование результатов применения технологий разработки осуществлено при условии производства одинакового количества металлов в единицу времени (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Сравнительные показатели вариантов производства металлов /
Comparative indicators of metal production options**

Показатели / indicators	Единицы / Units	Этапы / Stages		
		1	2	3
Добыто руды / Ore mined	т. т/год / tons t/year	130	240	-
Переработано хвостов обогащения / Tailings processed	т. т/год / tons t/year	-	-	1000
Содержание металлов в сырье / Metal content in raw materials	г/т / g/t	5	3	1
Количество металлов в сырье / Metal volume in raw materials	кг / kg	623	718	1010
Извлечение в концентрат / Extraction into concentrate	%	80	70	50
Добыто металлов в концентрате / Metals extracted in concentrate	кг / kg	510	500	500
Цена концентрата / Concentrate price	руб./кг / rub./kg	300	300	300
Стоимость концентратов / Concentrate cost	т. руб. / t. rub.	150000	150000	150000
Объем горной массы / Volume of rock mass	т. м ³ /год / t. m ³ /year	51	42	-
Образовано хвостов / Tailings produced	т. т/год / tons t/year	96	164	-
Стоимость попутных товаров / Cost of by-products	т. руб. / t. rub.	-	-	30000
Всего стоимость продуктов / Total cost of products	т. руб./год / t. rub./year	150000	150000	180000
Эксплуатационные расходы / Operating costs	руб./т / rub./t	1000	500	170
Расходы на добычу и обогащение / Mining and milling costs	т. руб. / t. rub.	125000	142000	170000
Прибыль на объем производства / Profit per volume of production	т. руб./год / t. rub./year	25000	8000	10000
Прибыль на 1 г товарной продукции / Profit per 1 g of marketable product	руб./г / rub./g	40	18	20
Эффективность производства / Production efficiency	%	145	100	109

1. Эффективность предлагаемой технологии определяется учетом совокупности технологических, экономических и экологических факторов.

2. Эколого-экономическая модель для определения эффективности утилизации некондиционного сырья объединяет экологический и экономический компоненты в рамках единой системы.

Эффективность переработки в дезинтеграторе повышают совмещением механической активации с увеличением температуры процесса (рис. 4).

В рабочей камере дезинтегратора сырье смешивается с жидкостью, подогретой до температуры 90...95 °С, под действием центробежных сил проникает сквозь ряды пальцев и отбрасывается на внешний диск, где частицы нужной крупности удаляются. Частицы же большего размера измельчаются дисками и вновь поступающими частицами.

Эффективность механохимической активации процессов выщелачивания доказана экспериментально при извлечении металлов из хвостов обогащения полиметаллических руд Садона, углей Российского Донбасса и железистых кварцитов Курской магнитной аномалии, где извлечение металлов в раствор достигало 70% от исходного содержания. Важно, что снижение содержания металлов до фонового уровня возможно при увеличении циклов переработки.

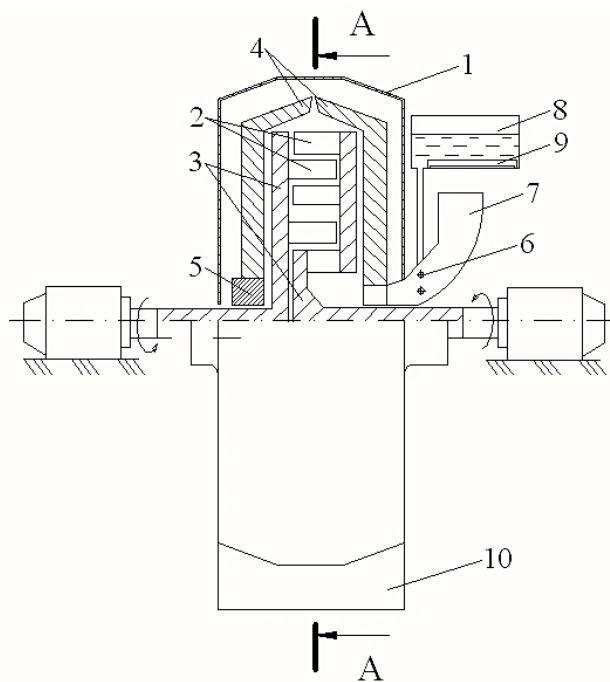


Рис. 4. Усовершенствованная конструкция дезинтегратора: 1 – корпус; 2 – пальцы; 3 – внутренний диск; 4 – внешний диск; 5 – механизм управления; 6 – форсунки; 7 – патрубок; 8 – емкость с жидкостью; 9 – нагревательный элемент; 10 – выпускное отверстие /
Fig. 4. Improved design of the disintegrator: 1 – body; 2 – load pins; 3 – inner disk; 4 – outer disk; 5 – control mechanism; 6 – nozzles; 7 – pipe; 8 – reservoir with liquid; 9 – heating element; 10 – outlet opening.

Основополагающие принципы рационализации техногенного цикла горно-металлургического предприятия изложены в ряде работ специалистов России [Петров и др., 2020; Бригида и др., 2020; Хайрутдинов и др., 2020] и Зарубежья [Lagneau et al., 2019; Löw et al., 2019].

Выводы

Возможность выщелачивания металлов из некондиционного сырья впервые в горной практике доказана экспериментами в дезинтеграторной установке ДЕЗ-11 в Отделе геологии, гидрогеологии и геоэкологии Геофизического института ВНЦ РАН.

Показатели механохимического выщелачивания могут быть улучшены за счет увеличения времени переработки.

Параметры безотходной переработки сырья в дезинтеграторе с использованием комбинированной механохимической активации описываются экономико-математической моделью.

Литература

1. Бригида В.С., Кожиев Х.Х., Сарян А.А., Джигоева А.К. Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 4. С. 20–32.
2. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Самусев А.Л., Хабарова И.А. Теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы и водные суспензии. // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 134–139.
3. Бурдзиева О.Г., Козырев Е.Н., Кортиев А.Л., Ревазов М.О. Особенности формирования геоэкологических рисков горной территории на основе анализа причинно-следственных связей геодинамических эндогенных и экзогенных процессов. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010.
4. Бывальцев А.В., Шарипов Р.Х., Васильев Е.А., Рудой Г.Н. Разработка рациональной технологии извлечения золота из хвостов Учалинской обогатительной фабрики. // Обогащение руд. – 2019. № 5. – С. 46–51.
5. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Вандышев А.М. Кафедре горного дела УГТУ – 100 лет. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 8. – С. 130–143.
6. Валиев Х.Х., Бугубаева А.У., Амандыкова А.Б., Булаев А.Г. Выщелачивание урана и молибдена из руды месторождения «Восток». // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – №. 4. – С. 92–99.
7. Галачиева С.В., Соколов А.А., Соколова О.А., Махошева С.А. Система оценки устойчивого развития региональных народнохозяйственных комплексов горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. № 3. – С. 329–335.
8. Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х., Харебов Г.Х. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России. // Вектор ГеоНаук. – 2019. – Т. 2. № 1. – С. 9–18.
9. Заалишвили В.Б., Бурдзиева О.Г., Кануков А.С., Дзобелова Л.В. Разработка карт индекса канцерогенного риска территории г. Владикавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. Т. 11. № 4. – С. 147–160. DOI: 10.46698/VNC.2021.98.22.012.
10. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В., Стровский В.Е. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к экономике замкнутого цикла. // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6. № 2. – С. 73–89.
11. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. // Горные науки и технологии. – 2020. Т. 5. № 2. – С. 104–118.
12. Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.
13. Петров Ю.С., Хадзарагова Е.А., Соколов А.А., Шарипзянова Г.Х., Таскин А.В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенно-

го цикла горно-металлургического предприятия. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11-1. – С. 178–188.

14. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. № 3. – С. 406–415.

15. Хайрутдинов М.М., Каунг П.А., Чжо З.Я., Тюляева Ю.С. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсо-возобновляемых технологий. // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 5. – С. 57–62.

16. Хинт И.А. УДА–технология: проблемы и перспективы. – Таллин: Валгус. 1981. 36 с.

17. Чантурия В.А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья. // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 67–84.

18. Doifode S.K., Matani A.G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. // International Journal of Chemical and Physical Sciences. – 2015. – Vol. 4. Special Issue. NCSC. – pp. 536–540.

19. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2020. – No. 5. – pp. 47–54.

20. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the Mizur mining and processing plant. // Metallurgist. – 2023. – Vol. 66. Nos. 11-12. – pp. 1476–1480.

21. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2016. – Vol. 8. No. 1. – pp. 46–51.

22. Lagneau V., Regnault O., Descostes M. Industrial Deployment of Reactive Transport Simulation: An Application to Uranium In situ Recovery. // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2019. – Vol. 85. Issue 1. – pp. 499–528.

23. Löf J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – Vol. 36. Issue 4. – pp. 701–707.

References

1. Brigida V.S., Kozhiev Kh.Kh., Saryan A.A., Dzhioeva A.K. Time-space problems in geoecology: An inter-disciplinary approach. Mining informational and Analytical Bulletin. 2020. No 4. pp. 20–32. (In Russ.)

2. Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Samusev A.L., Khabarova I.A. Composite physicochemical and energy action on geomaterials and aqueous slurries: theory and practice. Mining Journal. 2017. No. 11. pp. 134–139. (In Russ.)

3. Burdzieva O.G., Kozyrev E.N., Kortiev A.L., Revazov M.O. Features of formation of geoecological risks in the mountainous territory based on the analysis of cause-and-effect relations of geodynamic endogenous and exogenous processes. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13 No. 4. pp. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010. (in Russ.).

4. Byvaltsev A.V., Sharipov R.Kh., Vasilyev E.A., Rudoy G.N. Development of a sustainable technology for the recovery of gold from the tailings of the Uchalinsky concentrating plant. Mineral processing Journal. 2019. No. 5. pp. 46–51. (In Russ.)

5. Valiev N.G., Propp V.D., Vandyshev A.M. The 100th anniversary of the department of mining engineering of URSMU. Minerals and mining engineering. 2020. No. 8. pp. 130–143. (In Russ.)

6. Valiyev Kh.Kh., Bugubayeva A.U., Amandykova A.B., Bulaev A.G. Uranium and molybdenum leaching from the ore of “Vostok” deposit. Izvestiya Tula State University. 2019. No. 4. pp. 92–99. (In Russ.)

7. Galachieva S.V., Sokolov A.A., Sokolova O.A., Makhosheva S.A. Estimation system of sustainable development of regional national-economic complexes of mountain territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018. Vol. 10. No. 3. pp. 329–335. (In Russ.)
8. Dmitrak Y.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.Z. Mineral and raw materials base of nonferrous metallurgy of Russia. *Vector of geosciences*. 2019. Vol. 2. No. 1. pp. 9–18. (In Russ.)
9. Zaalishvili V.B., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Dzobelova L.V. Development of cancerogenic risk index maps for the territory of Vladikavkaz. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 No. 4. pp. 147–160. DOI: 10.46698/VNC.2021.98.22.012. (in Russ.)
10. Ignatyeva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Strovsky V.E. Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy. *Mining science and technology*. 202. Vol. 5. No. 2. pp. 73–89. (In Russ.)
11. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Development of environment-friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining science and technology*. 2020. Vol. 5. No. 2. pp. 104–118. (In Russ.)
12. Nureev R.R., Pashkevich M.A., Kharko P.A. Assessment of the impact of Copper Ore Enrichment Waste on Surface and Groundwater. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (No. 4. pp. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013. (in Russ.)
13. Petrov Yu.S., Khadzaragova E.A., Sokolov A.A., Sharipzyanova G.Kh., Taskin A.V. Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy: Outlines. *Mining informational and Analytical Bulletin*. 2020. Nos. 11-1. pp. 178–188. (In Russ.)
14. Rybak YA., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021. Vol. 13. No. 3. pp. 406–415. (In Russ.)
15. Khayrutdinov M.M., Kaung P.A., Chzho Z.Ya., Tyulyaeva Yu.S. Ensuring environmental safety in the implementation of the resource-renewable technologies. *Occupational Safety in Industry*. No. 5. pp. 57–62. (In Russ.)
16. Hint I.A. UDA-technology: problems and prospects. Tallinn, Valgus. 1981. 36 p. (In Russ.)
17. Chanturia V.A. Scientific substantiation and development of innovative approaches to integrated mineral processing. *Mining Journal*. 2017. No. 11. pp. 67–84. (In Russ.)
18. Doifode S.K., Matani A.G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2015. Vol. 4. Special Issue. NCSC. pp. 536–540.
19. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No. 5. pp. 47–54.
20. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for non-waste recovery of tailings of the Mizur mining and processing plant. *Metallurgist*. 2023. Vol. 66. Nos. 11-12. pp. 1476–1480.
21. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8. No. 1. pp. 46–51.
22. Lagneau V., Regnault O., Descostes M. Industrial Deployment of Reactive Transport Simulation: An Application to Uranium In situ Recovery. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2019. Vol. 85. Issue 1. pp. 499–528.
23. Lööw J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019. Vol. 36. Issue 4. pp. 701–707.